

УДК 621.165

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ», г. Харьков
А.П. УСАТЫЙ, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ», г. Харьков

КОМБИНАТОРНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИМИ КЛАПАНАМИ СИСТЕМЫ СОПЛОВОГО ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

У статті розглянута модель розрахунку соплового паророзподілу із заданою витратою робочого тіла, у якій задача позиціонування запірних елементів регулювальних клапанів вирішується за допомогою комбінаторного алгоритму. При цьому навантаження між сегментами регулюючого ступеня розподіляється таким чином, що для кожної заданої витрати пари досягається близька до максимально можливої потужність регулюючого ступеня. Модель включена в інтегрований інформаційний простір САПР «Турбоагрегат» і призначена для розв'язання задач оптимального синтезу й аналізу конструкцій осевих турбін, у тому числі й з урахуванням режимів їхньої експлуатації.

In the given paper model of computation of nozzle steam allocation with the given flow of a working body is considered, in which the task of position of shutoff elements of regulated valves is decided with the support of combinatorial algorithm. Thus loading between the segments of a regulating stage distributes in such a manner that for each given steam flow close to maximum possible capacity of a regulating stage is reached. The model is included in the integrated information space CAD «Turboagregat» that is designed for solving the tasks of optimum synthesis and analysis of construction of axial turbines, taking into account the modes of their operation.

Постановка и актуальность проблемы.

Вопросам, связанным с проектированием оптимальных конструкций проточных частей мощных паровых турбин посвящено достаточно много работ. Среди них наиболее важными и актуальными, на сегодняшний день, представляются работы, посвященные проблемам получения решений, способных обеспечить высокоэффективную работу осевых турбин на потенциально возможном множестве эксплуатационных нагрузок [1, 2].

Безусловно, невозможно адекватно учитывать влияние переменности режимных параметров на эффективность работы осевых турбин без использования моделей расчета систем парораспределения. Принимая во внимание, что в большинстве конструкций мощных паровых турбин управление режимами работы осуществляется с помощью систем соплового парораспределения, вопросы, связанные с моделированием их работы, представляются на сегодня достаточно важными. Особую актуальность они получили благодаря принципиальной возможности современных систем управления осуществлять независимое позиционирование регулирующих клапанов [3]. Применение таких систем управления позволяет перейти к новому классу задач оптимального проектирования, решение которых обеспечит учет взаимного влияния параметров соплового парораспределения и остальной проточной части на экономичность осевой турбины.

Таким образом, решение вопросов, связанных с разработкой моделей и алгоритмов расчета систем соплового парораспределения, является весьма важной и актуальной задачей.

Цель исследования.

Известно, что при оптимальном проектировании системы соплового парораспределения, особенно с учетом переменности эксплуатационных нагрузок, среди прочих оптимизируемых параметров немаловажную роль играют и

геометрические параметры регулирующих клапанов, в том числе и величины подъема их запорных элементов.

Целью настоящего исследования и является разработка модели расчета системы соплового парораспределения, способной эффективно определять положения запорных элементов клапанов, при которых будут обеспечиваться наилучшие показатели работы регулировочной ступени для любого заданного расхода пара.

Основное содержание.

Решение поставленной задачи может быть получено с использованием известной модели [4], в которой для обеспечения прохождения заданного расхода пара положения запорных элементов клапанов находятся посредством применения соответствующих оптимизационных алгоритмов. Учитывая, что для оптимального проектирования системы соплового парораспределения совместно с проточной частью осевой турбины понадобится многократное использование таких алгоритмов, общая задача оптимизации потребует существенных временных ресурсов. Предлагаемая в статье модель расчета системы соплового парораспределения обеспечивает необходимое для пропускания заданного расхода пара позиционирование регулирующих клапанов без использования оптимизационных алгоритмов. Причем, получаемые в этом случае комбинации положений запорных элементов обеспечивают работу регулировочной ступени с близкой к максимально возможной вырабатываемой мощности для любого заданного расхода пара. По сути, разработанная модель является неким более эффективным эквивалентом, с точки зрения потребления временных ресурсов, модели, построенной на решении оптимизационной задачи [4] с критерием качества – мощность регулировочной ступени.

Предварительные расчетные исследования, связанные с оптимизацией параметров системы соплового парораспределения, проведенные с различными критериями качества, показали высокую корреляцию результатов, получаемых соответственно для критериев качества – мощность турбины и мощность регулировочной ступени.

В свете вышеизложенного, применение рассматриваемой модели для выбора и расчета положения работающих регулирующих клапанов системы соплового парораспределения в задачах оптимального проектирования осевых турбин с учетом переменности эксплуатационных нагрузок выглядит вполне оправданным и перспективным.

Наиболее важной частью разработанной модели является комбинаторный алгоритм, который позволяет определять необходимые для работы комбинации сегментов регулировочной ступени, а также величины подъема запорных элементов соответствующих регулирующих клапанов.

Известно, что на промежуточных режимах эксплуатации мощность регулировочной ступени, в основном, определяется величиной ее располагаемого теплоперепада. КПД регулировочной ступени в этих случаях играет менее важную роль. В свою очередь величина располагаемого теплоперепада регулировочной ступени существенным образом (при прочих равных условиях) связана со срабатываемым перепадом на регулирующих клапанах. Последний напрямую зависит от суммарной площади работающих сегментов. Так, при уменьшении суммарной площади работающих сегментов, сохранение заданного расхода пара может быть обеспечено только увеличением располагаемого теплоперепада регулировочной ступени.

Отмеченный факт очевиден и вытекает из зависимости для расхода пара через сопловой сегмент, например [5]

$$G_{cc} = A \cdot \mu_{cc} \cdot F_{cc} \cdot \sqrt{h_{0cc}} / V_{cc}, \quad (1)$$

где G_{cc} – расход пара через сегмент; A – константа; μ_{cc} – коэффициент расхода; F_{cc} – проходная площадь сегмента; h_{0cc} – располагаемый теплоперепад сегмента; V_{cc} – удельный объем пара в конце адиабатического расширения, соответствующий перепаду h_{0cc} .

Учитывая выше изложенное, постановка рассматриваемой задачи может быть сформулирована следующим образом: среди всевозможных сочетаний сегментов, способных совместно пропускать заданный расход пара, найти такую комбинацию сегментов, у которой будет наименьшая суммарная площадь при минимальных потерях на дросселирование. По своей сути данная задача близка задаче, связанной с минимизацией потерь от дросселирования пара, что эквивалентно работе регулировочной ступени с максимально возможными подъемами запорных элементов регулирующих клапанов. Для ее решения воспользуемся комбинаторным алгоритмом формирования массива суммарных площадей различных комбинаций сегментов регулировочной ступени. Так, например, для регулировочной ступени с четырьмя сегментами в соответствующий массив F будут внесены площади следующих комбинаций сегментов:

- Площади отдельных сегментов с номерами 1, 2, 3, 4.
- Суммарные площади оригинальных парных комбинаций сегментов с номерами 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4.
- Суммарные площади оригинальных комбинаций по три сегмента соответственно 1-2-3, 1-2-4, 1-3-4, 2-3-4.
- Площадь всех сегментов 1-2-3-4.

Отсортировав элементы массива F по возрастанию, получим упорядоченную последовательность из двенадцати оригинальных комбинаций сегментов и связанных с ними регулирующих клапанов.

Оценка пропускной способности рассматриваемых комбинаций работающих сегментов осуществляется с помощью модели совместного расчета соплового парораспределения и проточной части турбины [4].

Блок-схема алгоритма решения комбинаторной задачи приведена на рисунке 1. Модель, основанная на предложенном комбинаторном алгоритме управления регулируемыми клапанами, интегрирована в САПР «Турбоагрегат» и использует структурную топологию ее единого информационного пространства [6], обеспечивающую однозначную связь между сегментами регулировочной ступени и подчиненными им регулируемыми клапанами (рис. 2). Это позволило полностью снять вопросы, связанные с идентификацией соответствующих регулирующих клапанов для каждой комбинации работающих сегментов. Отмеченное обстоятельство упрощает алгоритм и обеспечивает более эффективное решение данной задачи.

Как видно из рисунка 1, на первом этапе работы алгоритма осуществляется поиск необходимой комбинации работающих сегментов с одновременной проверкой пропускной способности системы. Для этого для каждой проверяемой комбинации сегментов моделируется полное открытие всех, связанных с ней регулирующих клапанов, и проводится расчет всей системы по варианту модели с заданными

высотами подъемов регулирующих клапанов [4]. Если в результате расчета окажется, что $G_p < G_3$ (G_3 , G_p – заданное и расчетное значения расходов пара соответственно), алгоритм выберет следующую комбинацию работающих сегментов, имеющую большую суммарную площадь, и описанные выше операции повторятся.

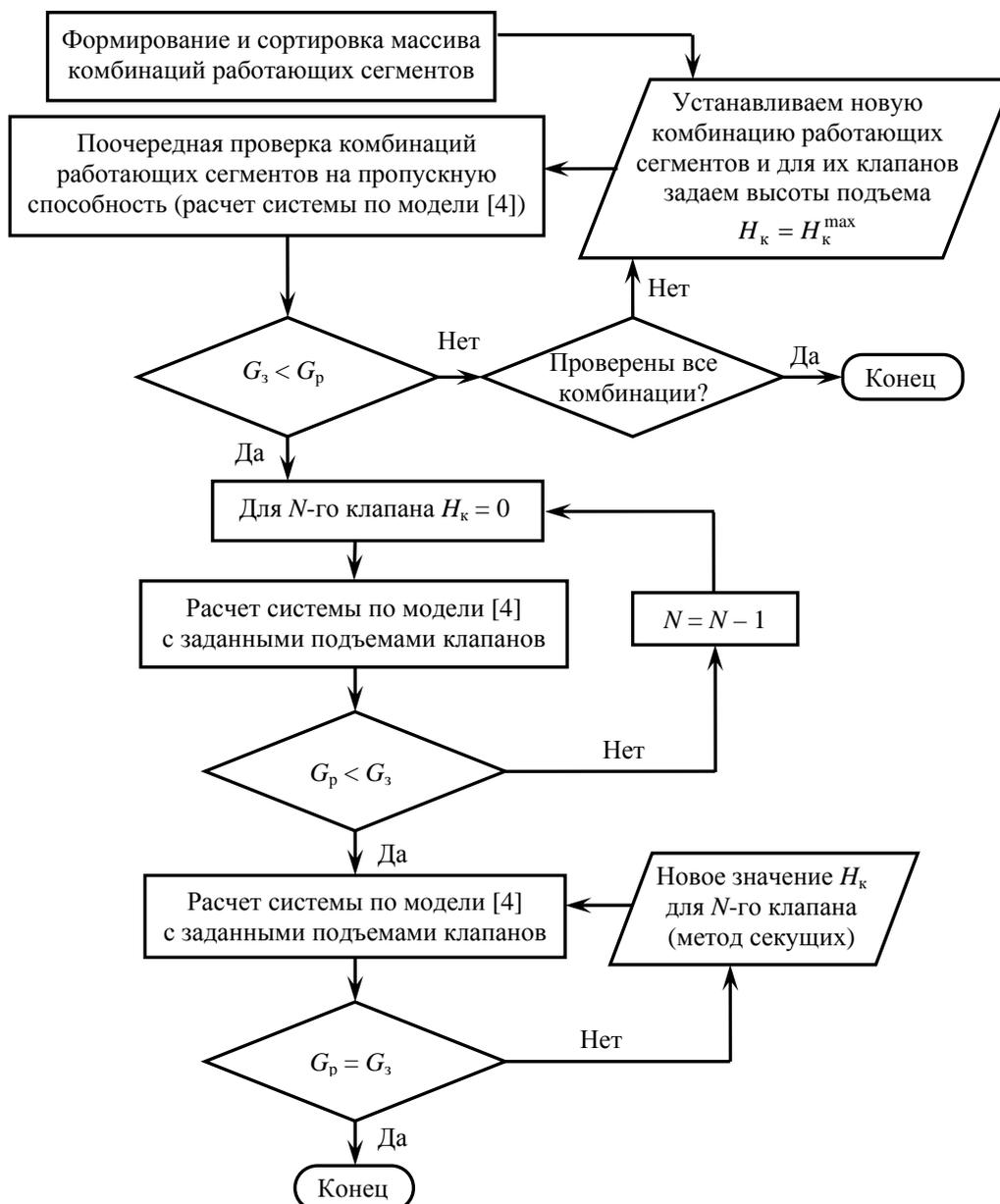


Рис. 1. Блок-схема алгоритма поиска требуемой комбинации работающих сегментов и определения положения активных регулирующих клапанов для заданного расхода пара

В случае, если будут задействованы все сегменты регулировочной ступени и окажется, что $G_p < G_3$, алгоритм завершит свою работу. При этом будет определен расход пара, равный максимальной пропускной способности данной конструкции соплового парораспределения.

После того, как будет определена необходимая комбинация работающих сегментов, алгоритм найдет регулирующий клапан (из числа активных для данной

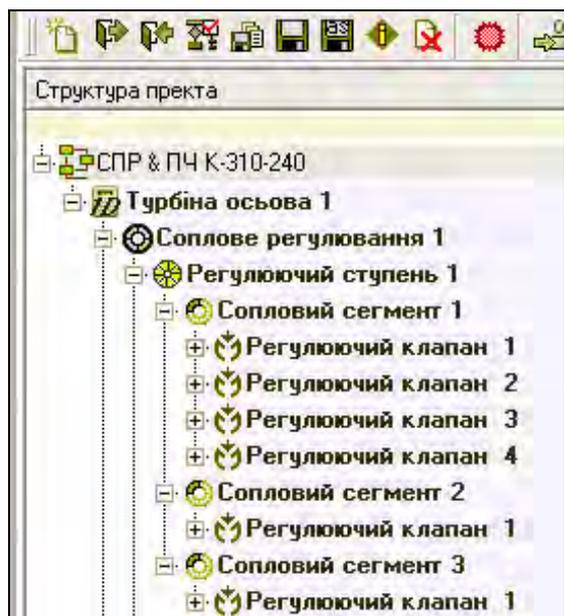


Рис. 2. Структурная топология системы соплового парораспределения

комбинации сопловых сегментов), в зоне работы которого находится заданный расход. Для нахождения такого клапана необходимо выполнение двух условий: $G_3 < G_p$ – при полностью открытом клапане и $G_p < G_3$ – при полностью закрытом клапане. Точное значение высоты подъема найденного клапана, обеспечивающее прохождение требуемого расхода пара, определяется численным решением уравнения $G_3 = G_p = f(H_k)$. Для решения этого уравнения применяется метод секущих. Следует отметить, что при расходах пара не сильно отличающихся от расчетно-номинального значения, предложенная модель находит решения, аналогичные традиционным. В то же время, на пониженных режимах получаемые решения существенным образом отличаются от традиционных, т.к. в работу

включаются совершенно иные сегменты. При этом достигается более высокая мощность регулировочной ступени и всей турбины в целом.

В качестве примера в таблице 1 приведены высоты подъема запорных элементов регулирующих клапанов, полученные с помощью традиционного и комбинаторного моделирования управления их положениями для различных расходов пара.

Рисунки 3–8 показывают отличия основных характеристик турбины и ее регулировочной ступени при традиционном моделировании позиционирования регулирующих клапанов и их позиционирования, определяемого с помощью решения рассматриваемой комбинаторной задачи.

Моделирование подъема запорных элементов регулирующих клапанов первого сегмента в обоих вариантах осуществлялось попарно, аналогично реальной конструкции системы соплового парораспределения. Все расчеты осуществлялись с неизменными значениями давления и энтальпии торможения перед стопорным клапаном, а также при постоянном значении статического давления за последней ступенью цилиндра низкого давления.

Нумерация кривых на рисунках соответствует правилам моделирования подъема запорных элементов регулирующих клапанов: 1 – комбинаторное позиционирование, 2 – традиционное позиционирование.

Для определения КПД турбины (рис. 4) использовалась следующая зависимость

$$\text{КПД}_T = \frac{N_{PC} + N_{ЦВД} + N_{ЦСД} + N_{ЦНД}}{N_{0PC} + N_{0ЦВД} + N_{0ЦСД} + N_{0ЦНД}} / G, \quad (2)$$

где N_{PC} , $N_{ЦВД}$, $N_{ЦСД}$, $N_{ЦНД}$ – мощности регулировочной ступени (РС), цилиндра высокого давления (ЦВД), цилиндра среднего давления (ЦСД) и сумма мощностей цилиндров низкого давления (ЦНД), соответственно; N_{0PC} , $N_{0ЦВД}$, $N_{0ЦСД}$, $N_{0ЦНД}$ –

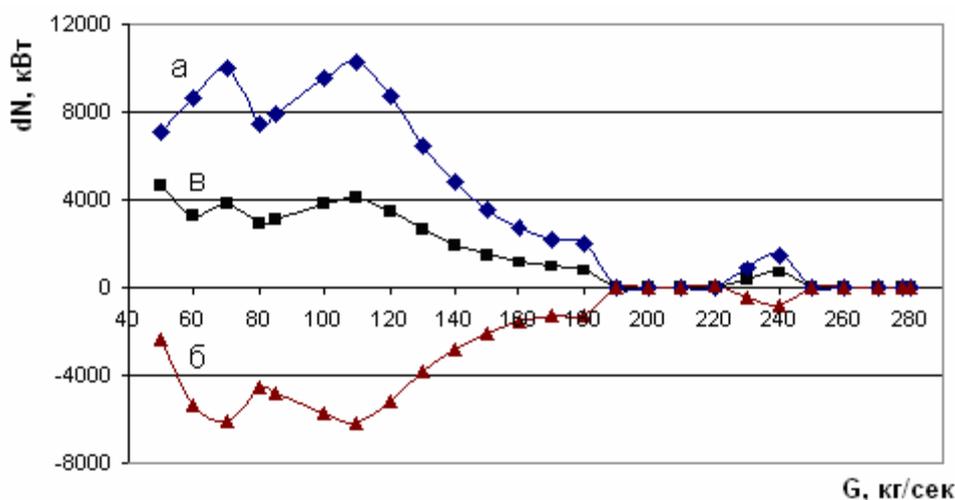
располагаемые теплоперепады, соответственно РС, ЦВД, ЦСД и ЦНД; G – расход пара через регулировочную ступень.

Как видно из рисунков 3, 4 применение комбинаторного алгоритма для определения сочетаний работающих сегментов и соответствующего позиционирования, связанных с ними регулирующих клапанов, позволяет повысить эффективность турбины и получить существенный прирост мощности, особенно на режимах, отличных от расчетно-номинального.

Таблица 1

Высоты подъема запорных элементов регулирующих клапанов системы соплового парораспределения турбины К-310-240 при моделировании традиционного и комбинаторного позиционирования

G , кг/сек	Традиционное позиционирование запорных элементов регулирующих клапанов						Комбинаторное позиционирование запорных элементов регулирующих клапанов					
	Сегм. №1				Сегм. №2	Сегм. №3	Сегм. №1				Сегм. №2	Сегм. №3
	$H_{к1}$, мм	$H_{к2}$, мм	$H_{к3}$, мм	$H_{к4}$, мм	$H_{к1}$, мм	$H_{к1}$, мм	$H_{к1}$, мм	$H_{к2}$, мм	$H_{к3}$, мм	$H_{к4}$, мм	$H_{к1}$, мм	$H_{к1}$, мм
50	5,11	5,11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,42	0,0
70	7,30	7,30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,34	0,0
90	9,71	9,71	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,40	0,0
110	11,23	11,23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,31	0,0
130	13,32	13,32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,85	2,21
150	15,32	15,32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,85	4,82
170	27,01	27,01	0,63	0,63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,85	7,15
190	27,01	27,01	5,77	5,77	0,0	0,0	27,01	27,01	5,77	5,77	0,0	0,0
210	27,01	27,01	29,23	29,23	0,77	0,0	27,01	27,01	29,23	29,23	0,0	0,77
230	27,01	27,01	29,23	29,23	4,32	0,0	27,01	27,01	29,23	29,23	0,0	4,22
250	27,01	27,01	29,23	29,23	8,70	0,0	27,01	27,01	29,23	29,23	0,0	17,06
270	27,01	27,01	29,23	29,23	21,85	2,76	27,01	27,01	29,23	29,23	21,85	2,76
277,8	27,01	27,01	29,23	29,23	21,85	7,49	27,01	27,01	29,23	29,23	21,85	7,49



a – регулировочной ступени; b – части давления ЦВД, ЦСД и ЦНД;
 v – прирост мощности турбины, полученный от применения комбинаторного алгоритма

Рис. 3. Изменение мощности турбины К-310-240

Полученные результаты достаточно хорошо объясняются с помощью рис. 5–8.

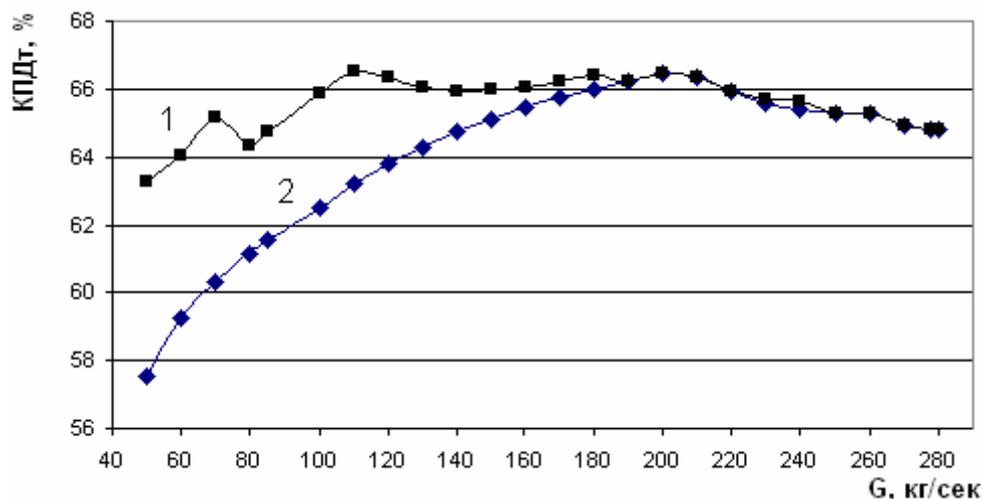


Рис. 4. КПД турбины К-310-240 при различных расходах пара

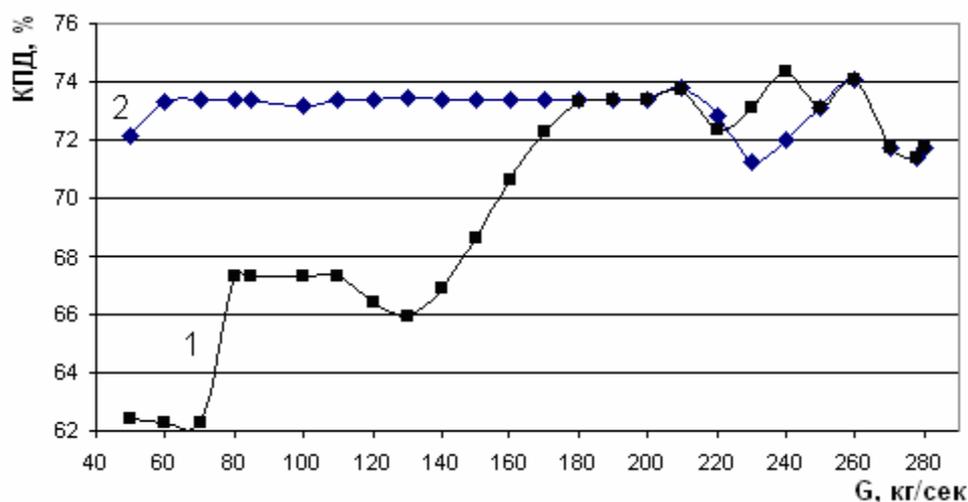


Рис. 5. КПД регулировочной ступени турбины К-310-240 при различных расходах пара

Из рисунка 5 видно, что экономичность регулировочной ступени при традиционном позиционировании запорных элементов регулирующих клапанов, в большей части диапазона изменения расхода превышает экономичность, получаемую при использовании рассмотренного выше комбинаторного определения работающих сегментов и позиционирования, связанных с ними регулирующих клапанов. Однако, благодаря тому, что комбинаторный алгоритм позволяет находить сочетания работающих сегментов с **минимальной суммарной пропускной площадью**, удастся существенным образом **повысить располагаемый теплоперепад регулировочной ступени** (рис. 6) и, **соответственно, повысить ее мощность** (рис. 7) в большей части диапазона изменения расхода. Существенное увеличение мощности регулировочной ступени, безусловно, положительно сказывается на мощности всей турбины и ее экономичности (рис. 3, 4). Кроме того, дополнительно проведенный сравнительный анализ паровых циклов (рис. 8) показал, что использование предложенного комбинаторного алгоритма управления регулируемыми клапанами позволяет не

только увеличивать мощность всей турбины на пониженных режимах, но и приводит к повышению общей экономичности цикла (табл. 2).

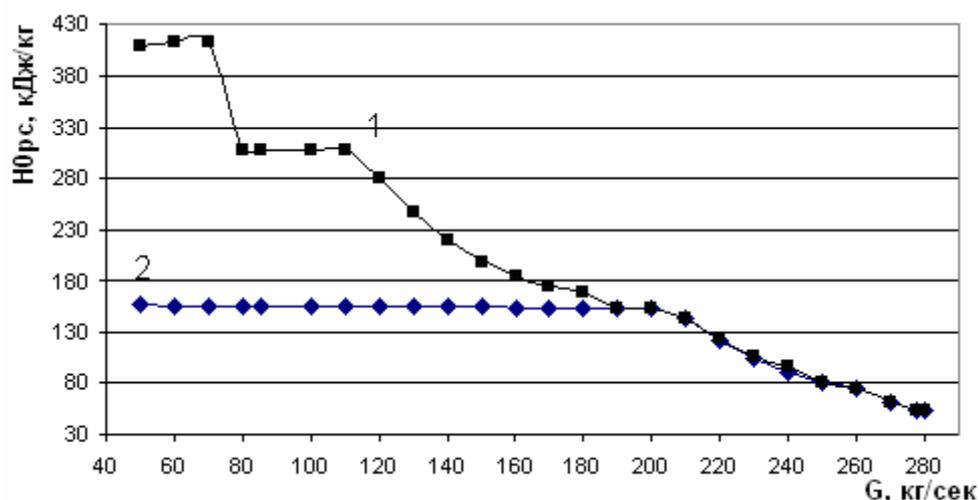


Рис. 6. Располагаемый теплоперепад регулировочной ступени турбины К-310-240 при различных расходах пара

Проведенные расчеты показали, что применение комбинаторного позиционирования запорных элементов регулирующих клапанов в сочетании с современными системами управления их положениями, способными обеспечивать индивидуальное независимое позиционирования каждого клапана, позволит более полно использовать резервы повышения эффективности системы соплового парораспределения и всей турбины в целом.

Полученные результаты также подчеркивают важность и необходимость решения задач оптимального проектирования систем соплового парораспределения с учетом графиков потенциальных режимов работы.

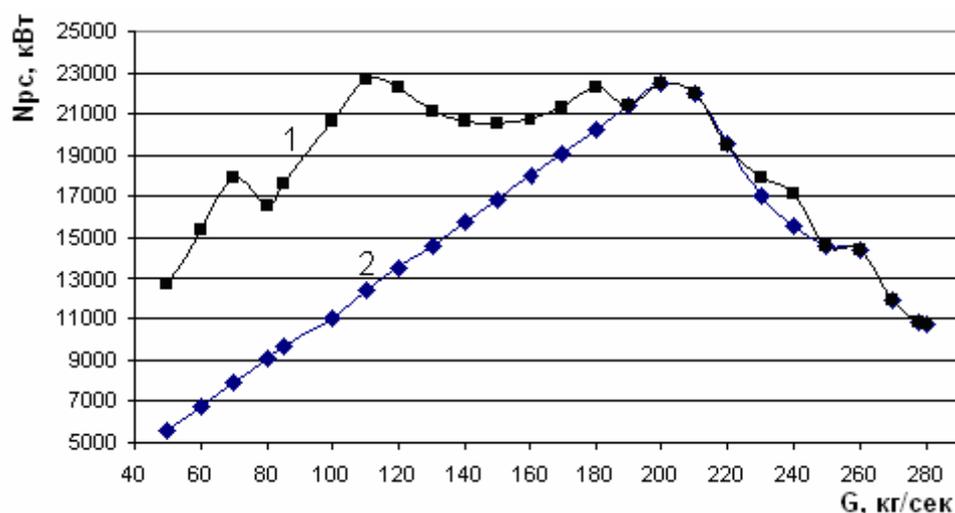


Рис. 7. Мощность регулировочной ступени турбины К-310-240 при различных расходах пара

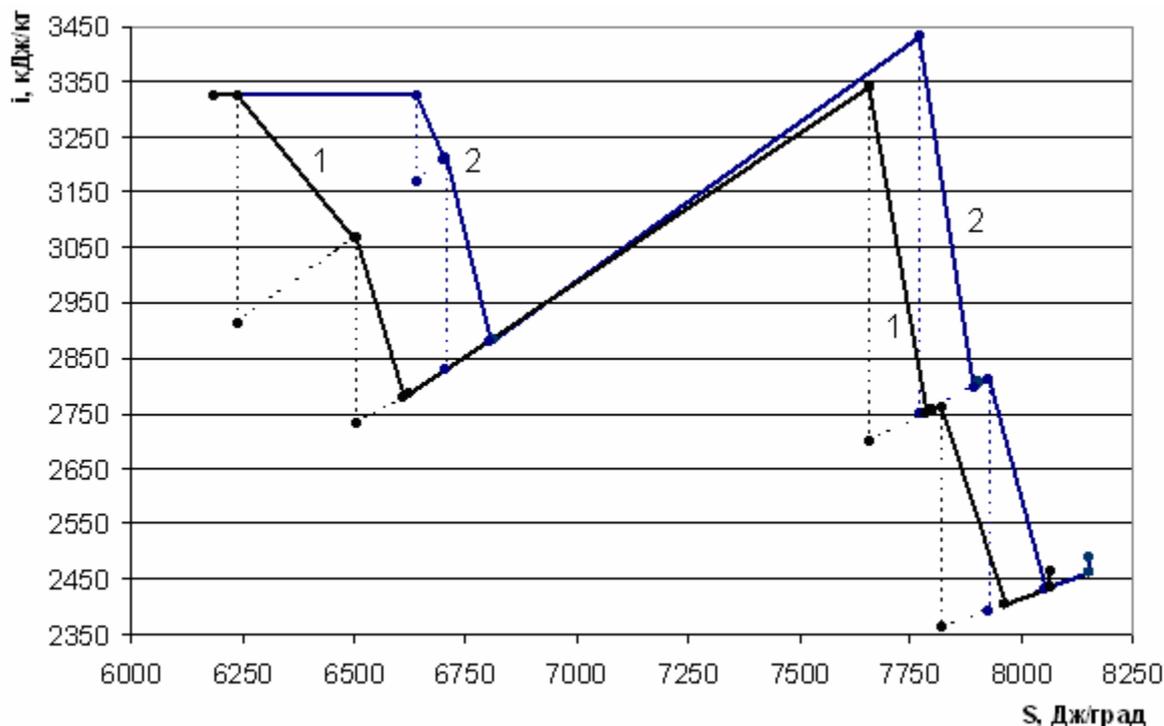


Рис. 8. $I-S$ диаграмма процессов расширения пара в турбине К-310-240 при массовом расходе пара 70 кг/сек

Эффективность паровых циклов турбины К-310-240 при массовом расходе пара 70 кг/сек Таблица 2

Вариант	η_t , %	η_{oi} , %	η_a , %	l_t , кДж/кг	Q_t , кДж/кг
1	45,799	81,252	37,213	1368,93	2987,80
2	41,848	86,269	36,102	1209,24	2889,63
Отклонение	3,951	-5,017	1,111	159,69	98,17

Здесь η_t , η_{oi} , η_a , l_t , Q_t – термический КПД цикла, внутренний относительный КПД цикла, абсолютный КПД цикла, теоретическая работа цикла и величина подведенного к циклу тепла (за счет сжигания топлива) соответственно.

Как видно из таблицы 2, использование комбинаторного алгоритма управления регулирующими клапанами с одной стороны приводит к повышению η_t , а с другой – ведет к снижению η_{oi} и требует большего подвода тепла Q_t . Вместе с тем, существенное увеличение располагаемого теплоперепада регулировочной ступени (рис. 8) и, как следствие, теоретической работы цикла позволило получить общий положительный результат и повысить абсолютный КПД цикла на 1,111 %.

Следует отметить, что результаты оптимизации, основанные на моделировании влияния на эффективность турбины и парового цикла положений запорных элементов регулирующих клапанов, могут найти свое применение в программно-техническом комплексе электрогидравлической системы регулирования [3] в виде информации об оптимальных положениях клапанов для любого сочетания режимных параметров. К числу этих параметров, в данном случае, можно отнести расход пара, давление в

конденсаторе, величины отбора пара на регенеративный подогрев и теплофикацию и др.

В рамках данной работы не рассматривались вопросы, связанные с оценкой прочности элементов регулировочной ступени, а также вопросы, связанные с изменением абсолютной величины и направления вектора радиальных сил, действующих на ротор. Они, безусловно, должны найти свое решение при реальном проектировании ЦВД и системы соплового парораспределения.

Выводы

1. Разработан комбинаторный алгоритм управления позиционированием запорных элементов регулирующих клапанов и реализована новая постановка задачи расчета системы соплового парораспределения с заданным расходом. Модель расчета, использующая комбинаторный алгоритм, интегрирована в единое информационное пространство САПР «Турбоагрегат».

2. Проведенные расчетные исследования, подтвердили не только правомочность использования комбинаторного алгоритма в задачах оптимального проектирования систем соплового парораспределения, но и необходимость проектирования систем соплового парораспределения с использованием оптимизационных алгоритмов, учитывающих потенциальные режимы работы турбин.

3. Существенное влияние алгоритмов управления регулирующими клапанами на экономичность турбины и парового цикла в целом, подчеркивает необходимость использования данной информации при разработке систем управления режимами работы паровых турбин.

Список литературы: 1. *Boiko A.V.* Optimal design of turbines taking into consideration the mode of operation, Proceedings (2009) / A.V. Boiko, Yu.N. Govorushchenko, A.P. Usaty, and A.S. Rudenko // 8th European Turbomachinery Conference, March 23-27, 2009. – Graz, Austria. – PP. 559-569. 2. *Усатый А.П.* Островная модель генетического алгоритма в задачах оптимизации осевых турбин с учетом переменного режима работы // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 3. – С. 56-66. 3. *Субботин В.Г.* Электрогидравлические системы регулирования паровых турбин ОАО «Турбоатом» / В.Г. Субботин, А.С. Бураков, В.Ю. Рохленко, В.Л. Швецов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 3. – С. 98-104. 4. *Усатый А.П.* Модели расчета систем соплового парораспределения в задачах многорежимной оптимизации // Энергосбережение энергетика энергоаудит. – Харьков, 2010. – № 4(74). – С. 23-28. 5. *Чупирев Д.А.* Проектирование и тепловые расчеты стационарных паровых турбин. – Киев: МАШГИЗ, 1953. – 258 с. 6. *Бойко А.В.* Программная реализация единого информационного пространства интегрированной системы автоматизированного проектирования «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Электронное моделирование. – Киев: Институт проблем моделювання в енергетиці НАН України, 2009. – № 2, Том 31. – С. 43-55.

© Бойко А.В., Усатый А.П., 2011
Поступила в редколлегию 14.02.11